

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160646

卢闯, 逢焕成, 赵长海, 王婧, 常晓莲, 李玉义. 水分胁迫下施磷对潮土玉米苗期叶片光合速率、保护酶及植株养分含量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 239–246

Lu C, Pang H C, Zhao C H, Wang J, Chang X L, Li Y Y. Effect of phosphorus on leaf net photosynthesis, protective enzyme activity and nutrient uptake of maize at seedling stage in fluvo-aquic soils under water stress[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(2): 239–246

水分胁迫下施磷对潮土玉米苗期叶片光合速率、 保护酶及植株养分含量的影响*

卢 闯¹, 逢焕成¹, 赵长海¹, 王 婧¹, 常晓莲², 李玉义^{1**}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 北京 100081; 2. 北京市农业机械试验鉴定推广站 北京 100079)

摘 要: 水分胁迫是潮土区玉米苗期生长的主要限制性因素, 本研究采用水磷二因素完全随机设计的盆栽试验, 设水分胁迫(W_1 , 田间持水量的 70%~75%)和充分供水(W_2 , 田间持水量的 85%~90%)2 个水分处理; 磷素处理设对照不施磷(P_1)、施磷 $0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (P_2)、 $0.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (P_3)、 $0.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (P_4)和 $0.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (P_5)5 个处理, 研究水分胁迫下施磷对玉米苗期叶片光合特性、酶活性及养分吸收的影响, 为潮土区农田水分和磷素合理施用提供科学依据。研究结果表明: 水分胁迫(W_1)降低了玉米苗期净光合速率(P_n), W_1 较 W_2 叶片 P_n 平均降低了 27.96%; 显著提高了玉米苗期丙二醛(MDA)含量, 平均提高 41.93%, 水分胁迫还降低了过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性。在 W_1 条件下施磷达到 P_2 水平叶片 P_n 即显著提高 27.56%, 而在 W_2 条件下施磷量只有达到 P_4 、 P_5 高水平时 P_n 才显著提高, 在 W_1 条件下施磷对 MDA 的抑制效果明显弱于 W_2 。在 W_1 条件下施磷量在 P_3 水平 POD 和 CAT 活性最高, 而在 W_2 条件下 POD 和 CAT 活性在 P_4 达到最大值。 W_1 条件下适宜的施磷量(P_2 至 P_4)可以增加苗期玉米植株氮磷含量, 但对钾含量影响较小; 在 W_2 条件下增施磷有利于植株氮磷含量的增加, 但钾素含量出现降低。综上, 适宜的施磷量对潮土玉米苗期水分胁迫有一定的补偿作用, 在本试验条件下, P_3 处理在水分胁迫下更利于光合产物积累和玉米苗期抗逆性提高。

关键词: 潮土; 玉米; 水分胁迫; 施磷; 净光合速率; 保护酶活性; 养分含量

中图分类号: S143.2+2 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2017)02-0239-08

Effect of phosphorus on leaf net photosynthesis, protective enzyme activity and nutrient uptake of maize at seedling stage in fluvo-aquic soils under water stress*

LU Chuang¹, PANG Huancheng¹, ZHAO Changhai¹, WANG Jing¹, CHANG Xiaolian², LI Yuyi^{1**}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;
2. Popular, Experiment and Appraisal Station of Agriculture Machinery of Beijing, Beijing 100079, China)

Abstract: Water stress is a major limiting factor of seedling maize in fluvo-aquic soils. A pot experiment was conducted under greenhouse conditions to study the effect of water stress and P application on net photosynthetic rate (P_n), leaf protective enzymes activities and nutrients contents of maize at seedling stage. The experiment consisted of two water and five P

* 公益性行业(农业)科研专项经费(201303130, 201103001)资助

** 通讯作者: 李玉义, 主要从事水肥调控与盐碱地改良等方面研究。E-mail: liyuyi@caas.cn

卢闯, 主要从事水肥调控与盐碱地改良等方面研究。E-mail: lupeichuang@163.com

收稿日期: 2016-07-21 接受日期: 2016-09-15

* This research was supported by Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (201303130, 201103001).

** Corresponding author, E-mail: liyuyi@caas.cn

Received Jul. 21, 2016; accepted Sep. 15, 2016

treatments. The water treatments included water stress (W_1 , 70%–75% of field capacity) and sufficient water (W_2 , 85%–90% of field capacity), the P treatments included 0 g(P)·kg⁻¹(soil) (P_1), 0.05 g(P)·kg⁻¹(soil) (P_2), 0.10 g(P)·kg⁻¹(soil) (P_3), 0.15 g(P)·kg⁻¹(soil) (P_4) and 0.20 g(P)·kg⁻¹(soil) (P_5). The results showed that compared with W_2 , W_1 treatment decreased P_n of maize leaf by 27.96%. Water stress significantly improved mean MDA content of maize leaf by 41.93%. But water stress decreased POD and CAT activities of maize leaf. Under W_1 treatment, P_n significantly increased by 27.56% at P_2 level over P_1 level, but further increased in P supply had no significantly promoting effect on P_n . The inhibition effect of P use on MDA under W_1 was significantly lower than that under W_2 treatment. The activities of POD and CAT were maximum at P_3 level under W_1 , while those of POD and CAT were maximum at P_4 level under W_2 treatment. It was also noted that suitable P treatments (P_2 , P_3 and P_4) beneficially increased N and P contents of maize plant, while it had little effect on K content under W_1 Treatment. Under W_2 treatment, increase in P supply beneficially increased N and P contents, but decreased K content of maize. In conclusion, suitable P application had a compensation effect on water stress in seedling maize in fluvo-aquic soils. Under the experimental conditions, P_3 treatment more favored the accumulation of photosynthetic processes and enhanced stress resistance of maize.

Keywords: Fluvo-aquic soil; Maize; Water stress; Phosphorus application; Net photosynthetic rate; Protective enzyme activity; Nutrient content

我国北方地区经常发生春旱,影响玉米种子萌发和幼苗的正常生长,给玉米(*Zea mays*)生产带来巨大损失^[1]。关于水分胁迫对玉米苗期形态和生理生化的影响已开展了许多研究,并主要涉及水分胁迫对玉米根叶保护酶、膜质过氧化产物以及苗期的根冠比、根长、根直径及根的分布等的影响^[2-6]。齐健等^[7]在玉米幼苗(四叶一心)时进行中度干旱胁迫(土壤水分含量为田间最大持水量的45%~50%)7 d的试验表明,中度干旱胁迫使玉米根系和地上部的生物量降低,根冠比增大,根系活力增强;根系和叶片中的游离脯氨酸含量升高。宋玉伟等^[3]在玉米幼苗生长至三叶一心期后开始控水并测定生理特性,结果表明,丙二醛(MDA)含量、细胞膜透性和渗透调节物质含量随着胁迫程度加深和胁迫时间延长明显增加,保护酶(SOD、POD、CAT)活性随着胁迫时间的延长,总体呈现出先升高后降低的趋势。

磷营养与水分之间有着密切的关系,水分影响磷在土壤中的移动和植物的吸收利用,合适的施磷水平能在一定程度上提高植物对干旱的适应性。在抗旱生理上,磷肥对不同的作物或品种抗旱影响不同,过去有关水分胁迫下施磷对小麦(*Triticum aestivum*)、大豆(*Glycine max*)生理和生长发育的影响研究较多^[8-12],而针对玉米这一作物的系统报道相对较少。曲东等^[13]通过对水分胁迫下玉米的研究指出,水分胁迫时施用磷肥能使玉米叶绿素和类胡萝卜素降解减慢;沈玉芳等^[14]研究表明施磷处理的玉米植株对干旱有较强的忍受能力和恢复能力,磷营养对作物根系导水率具有促进作用;王同朝等^[15]通过砂培桶栽试验表明玉米苗期施磷效应取决于水分的供应方式,干湿交替施磷能显著提高光合速率,增加作物气孔导度,促进根系生长,增加根冠比,

调节整株水平下干物质资源的合理分配,提高玉米苗期水分利用效率。苗期是决定玉米根、茎、叶等营养器官分化生长的关键时期,但总体来看,针对水分胁迫下施磷对玉米苗期叶片光合、保护酶及植株氮磷钾养分吸收影响的系统研究较少,对于潮土水分胁迫下玉米苗期适宜磷用量更缺乏报道。因此,本研究通过盆栽试验,设置土壤水分胁迫、供水充足两种处理,研究不同施磷量对玉米苗期生理、植株养分指标的变化趋势,为潮土区玉米苗期水分和磷素管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

盆栽试验在中国农业科学院控制温室内进行。试验所用塑料盆上开口下封底,盆底铺1 cm厚砂层,每盆按容重1.35 g·cm⁻³装入2.5 kg土。盆栽试验所用的土壤采自河南封丘站的潮土,土样经风干后,过2 mm孔径筛,土壤pH 7.96、有机质9.46 g·kg⁻¹、全氮0.45 g·kg⁻¹、全磷0.45 g·kg⁻¹、全钾13.08 g·kg⁻¹、速效氮42.06 mg·kg⁻¹、速效磷2.36 mg·kg⁻¹、速效钾54.22 mg·kg⁻¹,土壤田间最大持水量25.5%。供试作物为玉米,品种为‘郑单958’,播种后一叶一心时定苗,每盆均留5株健壮苗。

试验为水磷二因素完全随机设计,重复4次,共计40盆。水分处理参考有关文献^[5],分2个水平:水分胁迫 W_1 (叶片每次出现萎蔫后通过称重法补充水分至田间持水量的70%~75%)与充分供水 W_2 (与 W_1 同期灌溉,叶片每次出现萎蔫后称重,补充水分至田间持水量的85%~90%);磷素处理根据潮土磷素含量水平,从缺磷到磷过量设5个水平,即分别按每千克土外加磷0 g(P_1)、0.05 g(P_2)、0.10 g(P_3)、

0.15 g(P₄)、0.20 g(P₅), 合每公顷施磷肥 0 kg(P₁)、60 kg(P₂)、120 kg(P₃)、180 kg(P₄)、240 kg(P₅), 以磷酸二氢钙作磷源。各处理氮素、钾素施用量均按 0.15 g(N)·kg⁻¹(土)与 0.20 g(K)·kg⁻¹(土)施入, 以

保证氮素与钾素供应充分, 以尿素作氮源, 硫酸钾作 K 源。所有供试肥料溶于 100 mL 水后均匀喷洒于土壤。玉米苗期不同水磷组合长势情况见图 1。玉米拔节期前植株统一收获并烘干称重。

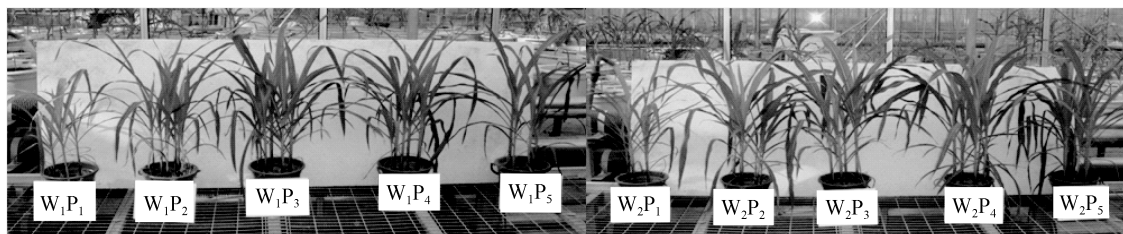


图 1 不同水磷组合玉米苗期长势情况

Fig. 1 Seedlings growth of maize under different combination of water and phosphorus conditions

W₁: 水分胁迫, 土壤含水量上限为田间持水量的 70%~75%; W₂: 充分供水, 土壤含水量下限为田间持水量的 70%~75%, 土壤含水量上限为田间持水量的 85%~90%。P₁: 每盆施磷 0 g, 合每公顷施磷肥 0 kg; P₂: 每盆施磷 0.05 g, 合每公顷施磷肥 60 kg; P₃: 每盆施磷 0.10 g, 合每公顷施磷肥 120 kg; P₄: 每盆施磷 0.15 g, 合每公顷施磷肥 180 kg; P₅: 每盆施磷 0.20 g, 合每公顷施磷肥 240 kg。W₁: water stress, the upper limit of soil water content is 70%~75% field capacity; W₂: sufficient water supply, the upper limit of soil water content is 85%~90%. P₁: phosphorus application rate is 0 g per pot, equivalent to 0 kg·hm⁻²; P₂: phosphorus application rate is 0.05 g per pot, equivalent to 60 kg·hm⁻²; P₃: phosphorus application rate is 0.10 g per pot, equivalent to 120 kg·hm⁻²; P₄: phosphorus application rate is 0.15 g per pot, equivalent to 180 kg·hm⁻²; P₅: phosphorus application rate is 0.20 g per pot, equivalent to 240 kg·hm⁻².

1.2 测定项目和方法

1) 叶片光合速率: 播种出苗后 40 d, 在上午 10:00 利用 Licor-6400 便携式光合仪测定不同处理玉米地上部第 1 片完全展开叶的叶片净光合速率(P_n), 测定时光强设定为 1 500 μmol·m⁻²·s⁻¹, 每个处理重复 4 次。

2) 叶片酶活性: 玉米拔节期前收获植株, 取上部第 1 片完全展开叶进行酶活性测定, 采集的玉米叶片迅速保存于液氮罐, 以防止酶失活, 叶片 MDA 含量采用硫代巴比妥酸法^[16]测定, SOD 活性采用 NBT 还原法^[17]测定, POD 活性采用愈创木酚法^[18]测定, CAT 活性采用 Chance 方法^[19]测定。

3) 植株养分: 拔节期前取地上植株烘至恒重, 称干重后粉碎植株, 参照鲍士旦方法^[20], 植株氮用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 碱解蒸馏法测定; 磷用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 钒钼黄比色法测定; 钾含量用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 火焰光度法测定。

1.3 数据分析

利用 Microsoft Excel 2007 进行数据初步处理, SPSS16.0 对数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 水分胁迫下施磷对玉米苗期叶片光合速率的影响

图 2 为不同水磷组合玉米苗期在上午 10:00 的叶片净光合速率(P_n)。从图中可以看出, 水分胁迫(W₁)明显降低了玉米叶片 P_n, W₁ 较充分供水(W₂)叶

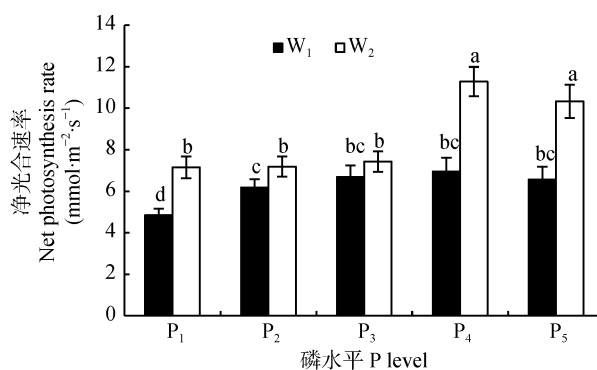


图 2 不同水磷组合对玉米苗期叶片净光合速率的影响

Fig. 2 Effects of different combinations of water and phosphorus on maize leaf net photosynthesis rate at seedling stage

W₁: 水分胁迫, 土壤含水量上限为田间持水量的 70%~75%; W₂: 充分供水, 土壤含水量下限为田间持水量的 70%~75%, 土壤含水量上限为田间持水量的 85%~90%。P₁: 每盆施磷 0 g, 合每公顷施磷肥 0 kg; P₂: 每盆施磷 0.05 g, 合每公顷施磷肥 60 kg; P₃: 每盆施磷 0.10 g, 合每公顷施磷肥 120 kg; P₄: 每盆施磷 0.15 g, 合每公顷施磷肥 180 kg; P₅: 每盆施磷 0.20 g, 合每公顷施磷肥 240 kg。W₁: water stress, the upper limit of soil water content is 70%~75% field capacity; W₂: sufficient water supply, the upper limit of soil water content is 85%~90%. P₁: phosphorus application rate is 0 g per pot, equivalent to 0 kg·hm⁻²; P₂: phosphorus application rate is 0.05 g per pot, equivalent to 60 kg·hm⁻²; P₃: phosphorus application rate is 0.10 g per pot, equivalent to 120 kg·hm⁻²; P₄: phosphorus application rate is 0.15 g per pot, equivalent to 180 kg·hm⁻²; P₅: phosphorus application rate is 0.20 g per pot, equivalent to 240 kg·hm⁻².

片 P_n 平均降低 27.96%。W₁ 条件下施磷达到 P₂ 水平即显著提高玉米叶片 P_n, 与对照 P₁ 相比, W₁ 条件下各施磷处理 P₂、P₃、P₄ 和 P₅ 的玉米叶片 P_n 分别提高 27.56%、37.97%、43.37% 和 35.29%。而在 W₂ 条件

下, 少量施磷作用并不明显, 当施磷量达到 P_4 、 P_5 水平时玉米叶片 P_n 显著提高, 各施磷处理 P_2 、 P_3 、 P_4 和 P_5 叶片 P_n 分别比对照 P_1 提高 0.5%、3.86%、57.76%、44.44%。

2.2 水分胁迫下施磷对玉米苗期叶片保护酶和 MDA 的影响

MDA 是膜脂过氧化产物, 其含量升高表明细胞膜受到伤害, 膜的完整性遭到破坏。表 1 结果表明, 水分胁迫显著提高了玉米苗期 MDA 含量, W_1 较 W_2 叶片 MDA 含量平均提高 41.93%。施磷对抑制玉米苗期叶片 MDA 积累有显著影响, 随施磷量的增加玉米叶片 MDA 含量呈降低趋势, 但 W_1 条件下降低幅度明显低于 W_2 条件, W_1 条件下各施磷处理均值较 P_1 降低 17.85%, 而 W_2 条件下降低 21.54%。

由表 1 可见, W_1 条件下各施磷量处理玉米苗期

SOD 活性平均值略低于 W_2 条件, 但对于低施磷量 (P_1 、 P_2 、 P_3) 处理, W_1 下玉米 SOD 活性显著高于 W_2 条件; 而在施磷量较高 (P_4 、 P_5) 时, W_1 下 SOD 含量显著低于 W_2 , 表现出相反趋势。另外, 各施磷量处理在 W_1 条件下玉米 SOD 活性差异均达到显著水平, 且随施磷量增加 SOD 活性呈显著下降趋势; 而在 W_2 条件下, 随施磷量增加 SOD 呈先降低后增加, 至 P_4 处理达到较高水平后又出现下降的变化特点。

水分胁迫也降低了玉米苗期叶片 POD 活性, W_1 较 W_2 平均降低 5.1%。在两种水分条件下, 随施磷量增加 POD 活性均呈先增后降的趋势, 与对照不施磷处理 (P_1) 相比, 各施磷处理在 W_1 条件下 POD 活性平均提高 33.63%, 且在 P_3 处理 POD 活性达到最高, 比 P_1 高 40.51%, 而在 W_2 条件下, 各施磷处理较 P_1 平均提高 20.42%, 且在 P_4 处理叶片 POD 活性达到最高 (表 1)。

表 1 不同水磷组合对玉米苗期叶片保护酶活性和 MDA 含量的影响

Table 1 Effects of different combinations of water and phosphorus on maize leaf protective enzyme and MDA at seedling stage

水分处理 Water treatment	磷处理 Phosphorus treatment	丙二醛含量 MDA content (nmol·mg ⁻¹)	超氧化物歧化酶活性 SOD activity (U·mg ⁻¹)	过氧化物酶活性 POD activity (U·mg ⁻¹)	过氧化氢酶活性 CAT activity (U·mg ⁻¹)
W_1	P_1	0.584±0.033a	13.92±0.033a	1.249±0.041e	0.123±0.003d
	P_2	0.557±0.031ab	12.84±0.053b	1.632±0.039b	0.206±0.008b
	P_3	0.513±0.026b	11.20±0.046c	1.755±0.029a	0.239±0.012a
	P_4	0.417±0.028c	9.36±0.038e	1.715±0.048ab	0.231±0.016ab
	P_5	0.432±0.011c	8.56±0.030f	1.574±0.019c	0.190±0.005c
平均值 Average		0.501	11.176	1.585	0.198
W_2	P_1	0.426±0.023c	12.15±0.054bc	1.435±0.022d	0.187±0.009c
	P_2	0.442±0.023c	11.50±0.069c	1.683±0.033b	0.220±0.017ab
	P_3	0.357±0.028d	10.06±0.012d	1.761±0.028a	0.247±0.012a
	P_4	0.253±0.021e	12.09±0.063bc	1.767±0.027a	0.253±0.018a
	P_5	0.285±0.025e	10.98±0.065c	1.702±0.048ab	0.214±0.004b
平均值 Average		0.353	11.356	1.670	0.224

W_1 : 水分胁迫, 土壤含水量上限为田间持水量的 70%~75%; W_2 : 充分供水, 土壤含水量下限为田间持水量的 70%~75%, 土壤含水量上限为田间持水量的 85%~90%。 P_1 : 每盆施磷 0 g, 合每公顷施磷肥 0 kg; P_2 : 每盆施磷 0.05 g, 合每公顷施磷肥 60 kg; P_3 : 每盆施磷 0.10 g, 合每公顷施磷肥 120 kg; P_4 : 每盆施磷 0.15 g, 合每公顷施磷肥 180 kg; P_5 : 每盆施磷 0.20 g, 合每公顷施磷肥 240 kg。同列数据后不同小写字母表示处理间差异在 0.05 水平上显著。 W_1 : water stress, the upper limit of soil water content is 70%~75% field capacity; W_2 : sufficient water supply, the upper limit of soil water content is 85%~90%. P_1 : phosphorus application rate is 0 g per pot, equivalent to 0 kg·hm⁻²; P_2 : phosphorus application rate is 0.05 g per pot, equivalent to 60 kg·hm⁻²; P_3 : phosphorus application rate is 0.10 g per pot, equivalent to 120 kg·hm⁻²; P_4 : phosphorus application rate is 0.15 g per pot, equivalent to 180 kg·hm⁻²; P_5 : phosphorus application rate is 0.20 g per pot, equivalent to 240 kg·hm⁻². Different letters in a column mean significant difference at 0.05 level.

水分胁迫也降低了玉米苗期 CAT 活性, W_1 较 W_2 处理平均降低 11.78%。在两种水分条件下, 施磷对叶片 CAT 活性的影响与 POD 相似, 均随施磷量增加呈先增后降的变化, W_1 条件下 CAT 在 P_3 处理最高, 比 P_1 高 94.31%, 而在 W_2 条件下 CAT 在 P_4 处理达到最高 (表 1)。

2.3 水分胁迫下施磷对玉米植株养分含量的影响

从图 3 可以看出, 不同水磷组合对玉米苗期植

株氮含量影响显著。在 W_1 条件下, 随施磷量增加玉米植株氮含量呈波动变化, 其中对照 P_1 处理显著高于 W_2 条件, 而在 P_2 处理显著低于 W_2 条件, 至 P_4 水平又达到最高, 随后又出现显著下降; 而 W_2 条件下, 植株氮含量随施磷水平总体呈增加的特点, 在 P_5 水平下达到最高。

不同水磷组合也显著影响玉米苗期磷的吸收 (图 3)。 W_1 条件下, 不同施磷量处理 (P_2 到 P_4) 植株磷含

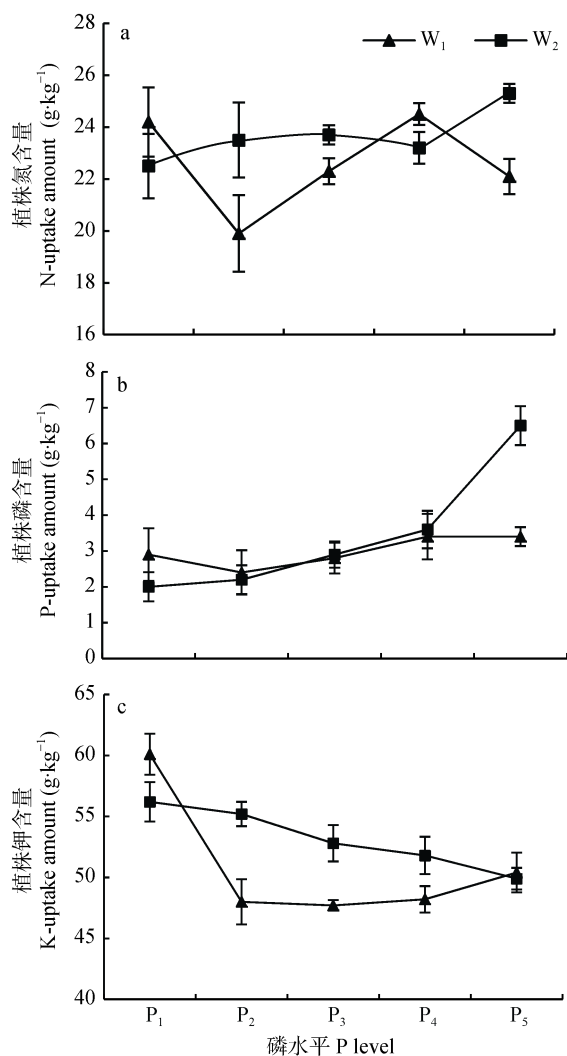


图3 不同水磷组合对玉米苗期植株氮(a)、磷(b)和钾(c)含量的影响

Fig. 3 Effects of different combinations of water and phosphorus on maize N (a), P (b) and K (c) contents at seedling stage

W₁: 水分胁迫, 土壤含水量上限为田间持水量的70%~75%; W₂: 充分供水, 土壤含水量下限为田间持水量的70%~75%, 土壤含水量上限为田间持水量的85%~90%。P₁: 每盆施磷0 g, 合每公顷施磷肥0 kg; P₂: 每盆施磷0.05 g, 合每公顷施磷肥60 kg; P₃: 每盆施磷0.10 g, 合每公顷施磷肥120 kg; P₄: 每盆施磷0.15 g, 合每公顷施磷肥180 kg; P₅: 每盆施磷0.20 g, 合每公顷施磷肥240 kg。W₁: water stress, the upper limit of soil water content is 70%~75% field capacity; W₂: sufficient water supply, the upper limit of soil water content is 85%~90%. P₁: phosphorus application rate is 0 g per pot, equivalent to 0 kg·hm⁻²; P₂: phosphorus application rate is 0.05 g per pot, equivalent to 60 kg·hm⁻²; P₃: phosphorus application rate is 0.10 g per pot, equivalent to 120 kg·hm⁻²; P₄: phosphorus application rate is 0.15 g per pot, equivalent to 180 kg·hm⁻²; P₅: phosphorus application rate is 0.20 g per pot, equivalent to 240 kg·hm⁻².

量总体呈缓慢上升趋势; 而在W₂条件下, 植株磷含量随施磷量增加一直呈上升的变化趋势, 且在施磷最高的P₅处理下达到最高, 表明充分供水条件下较高的施磷量更有利于苗期玉米磷素的吸收积累。从

不同施磷处理来看, 两种水分条件下P₂至P₄水平之间植株含磷量基本无差异, 而不施磷(P₁)、磷过量处理(P₅)两种水分管理方式间达到显著差异。

由图3可见, 不同水分条件下施磷对玉米苗期钾含量的影响不同于氮、磷, 在W₁条件下, 随施磷量的增加(P₂到P₅)玉米植株钾含量呈平缓增加的趋势, 但施磷(P₂到P₅)处理间植株钾含量差异不显著; 而在W₂条件下, 植株钾含量随施磷量的增加一直呈下降趋势。除对照和P₅外, 在W₁下各施磷量处理植株钾含量较W₂条件平均降低4.32%, 且在P₂、P₃、P₄存在显著差异。

3 讨论

磷对作物光合作用有重要调节作用, 水分亦是保持高光合的重要条件^[21]。Kramer^[22]认为营养缺乏会使作物产生类似于水分胁迫的生理生化和形态解剖性状变化。梁银丽等^[9]对小麦的研究指出, 磷素通过改善植物体内的水分关系可促进根系的吸收, 从而间接地影响植物的光合作用。在本试验条件下, 水分胁迫下玉米苗期叶片净光合速率(P_n)低于充分供水处理; 水分胁迫下少量施磷(P₂)可提高玉米叶片P_n, 说明少量的施磷量对水分胁迫下玉米苗期光合有一定的补偿作用, 但由于苗期玉米生长受养分影响较小, 水分胁迫较磷胁迫对叶片的光合作用影响更大, 因此随施磷量进一步增加, 玉米叶片P_n并没有显著提高。在充分供水条件下, 高磷量处理(P₄, P₅)显著提高叶片P_n, 这可能是因为水分充足条件下施用磷素改善了植物体内的生理活性, 增大了捕获外界CO₂的能力并提高了植物体与大气CO₂的交换频率, 从而提高了叶片P_n, 促进玉米干物质积累^[23]。

在逆境条件下, 植物细胞内活性氧自由基增加, 使细胞膜脂过氧化生成MDA, 而清除系统中的SOD、POD和CAT的活性就成为控制伤害的决定性因素^[24]。水分胁迫下根系吸水困难, 植物体内水分平衡被破坏, 引起生理代谢失调, 叶片MDA含量增加。葛体达^[2]、宋玉伟^[3]等研究表明玉米MDA含量会随水分胁迫程度加剧而增加。本研究也表明, 水分胁迫明显提高了玉米苗期叶片MDA含量。在水分胁迫下随施磷量的增加MDA含量呈降低趋势, 但其降低幅度明显小于充分供水条件。可见, 充分供水条件下施磷更有利于MDA含量的降低。另外, 水分胁迫条件下玉米叶片SOD活性平均值略低于充分供水条件, 说明水分胁迫降低了叶片SOD活性, 但水分胁迫下的SOD活性在低施磷量下(P₁、P₂、P₃)高于充分供水管理, 这可能是因为水分和磷素双重胁迫

诱导叶片产生更多的SOD来清除伤害,保证膜的结构和生理完整性^[4]。当施磷量较高(P_4 、 P_5)时,充分供水玉米叶片SOD活性显著高于水分胁迫,这说明只有在一定水分供应条件下,加大磷肥施用量才能够提高玉米苗期叶片SOD水平。本研究还发现,水分胁迫条件下玉米叶片POD和CAT活性在 P_3 处理达到最大值,表明适宜的施磷量对水分胁迫有一定的补偿作用,但施磷过多反而会降低这两种酶活性;而在充分供水下,叶片POD和CAT活性在 P_4 达到最大值,这可能是当供水充分时磷的有效性提高,且土壤水分较高,土水势降低,利于作物从土壤中吸收水分和营养元素^[25]。因此在供水充分条件下增加施磷更有利于提高苗期玉米叶片POD和CAT酶活性,增强其抗逆性,促进生长。

磷不仅是作物正常生长必需的元素,而且施用磷肥还利于养分的协调供应,促进植物根系的生长和根系活性的提高,进而提高植株对养分的吸收利用^[26-27]。本试验研究表明,水分胁迫条件下, P_2 至 P_4 含氮量逐渐增加,表明水分胁迫下施磷有利于植株对氮素的吸收。当施磷达到 P_5 水平时,含氮量又出现显著下降,因为过量施磷(P_5)会对玉米地上部及根系生长产生抑制^[23],造成地上部植株对土壤氮的吸收量降低;而在充分供水条件下增施磷反而有利于地上部植株氮含量的增加,这是因为土壤含水量增加后氮、磷等养分的移动性增大,养分的空间有效性增强,根系的吸收范围加宽,玉米植株对氮的吸收速率高于其本身的生长速率,氮含量提高。本研究还发现,在水分胁迫条件下,玉米植株磷含量随施磷量呈先缓慢增加后保持平缓的变化特征,过量施磷并不能明显提高植株磷含量;在充分供水条件下,玉米植株磷含量随施磷量增加呈上升变化特点,施磷量影响玉米地上生物量含磷量,这与黄莹等^[28]研究结果一致;从不同磷处理来看,不施磷(P_1)处理植株磷含量水分胁迫下显著高于供水充分条件,主要是玉米地上部生长速率下降导致的浓缩效应; P_2 至 P_4 水平之间玉米植株含磷量基本无差异,而过量施磷处理在供水充分条件下玉米植株磷含量远高于水分胁迫,这可能与水分供应充分致使玉米对土壤磷素奢侈吸收有关^[29-30]。不同水分条件下玉米苗期钾吸收不同于氮、磷,在水分胁迫下,随施磷量的增加玉米植株钾含量较为平缓,至 P_5 水平才出现略微增加,表明水分胁迫下施磷对钾含量影响较小;而在供水充分条件下,随施磷量的增加玉米苗期植株钾含量呈降低趋势,这主要是因为磷肥的施用促进了玉米的生长发育,使玉米的生物量增加,从而造

成玉米植株生长速率高于其对钾的吸收速率。另外,从不同施磷处理来看, P_2 到 P_4 在充分供水条件下植株钾含量明显高于水分胁迫,表明供水充分条件下适宜磷肥有利于植株钾素含量的提高。

4 结论

1)水分胁迫降低了潮土玉米苗期叶片 P_n ,在水分胁迫下少量施磷即显著提高叶片 P_n ,而在供水充分条件下只有高磷施用量才可显著提高 P_n 。

2)水分胁迫显著提高了玉米苗期叶片 MDA 含量,施磷可降低 MDA 含量,增强玉米保护酶活性,但水分胁迫条件下施磷过多也会降低过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性,二者均在 P_3 处理达到最高,而在充分供水条件下 POD 和 CAT 活性在 P_4 达到最大值。

3)水分胁迫下适宜的施磷量(P_2 至 P_4)可以增加苗期玉米植株氮磷含量,但对钾含量影响较小;在充分供水条件下施磷有利于植株氮磷含量的增加,但钾素含量降低。

综合来看,适宜的施磷量对潮土玉米苗期水分胁迫有一定的补偿作用,本试验条件下, P_3 处理在水分胁迫下更利于光合产物积累和玉米苗期抗逆性提高。

参考文献 References

- [1] 范翠丽,陈景堂,李育峰.玉米苗期及萌芽期抗旱性评定方法筛选[J].玉米科学,2007,15(3):114-117
Fan C L, Chen J T, Li Y F. Filtrate methods of drought-tolerance in maize during the germination stage and the seedling stage[J]. Journal of Maize Sciences, 2007, 15(3): 114-117
- [2] 葛体达,隋方功,白莉萍,等.水分胁迫下夏玉米根叶保护酶活性变化及其对膜脂过氧化作用的影响[J].中国农业科学,2005,38(5):922-928
Ge T D, Sui F G, Bai L P, et al. Effects of water stress on the protective enzyme activities and lipid peroxidation in roots and leaves of summer maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(5): 922-928
- [3] 宋玉伟,赵丽英,杨建伟.水分胁迫下玉米幼苗光合变化和生理特性分析[J].河南大学学报:自然科学版,2009,39(4):387-391
Song Y W, Zhao L Y, Yang J W. Analysis of photosynthesis and physiological characteristics of maize seedling under soil water stress[J]. Journal of Henan University: Natural Science, 2009, 39(4): 387-391
- [4] 杜彩艳,段宗颜,潘艳华,等.干旱胁迫对玉米苗期植株生长和保护酶活性的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(3):124-129
Du C Y, Duan Z Y, Pan Y H, et al. Effect of drought stress on growth and activities of antioxidant enzymes of maize

- seedling[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(3): 124–129
- [5] 王智威, 牟思维, 闫丽丽, 等. 水分胁迫对春播玉米苗期生长及其生理生化特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2013, 33(2): 343–351
- Wang Z W, Mou S W, Yan L L, et al. Effects of physiological and biochemical characteristics and growth under water stress in seedling of spring maize[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2013, 33(2): 343–351
- [6] 谢倩, 陈冠英, 陶洪斌, 等. 玉米播种期水分胁迫及补水对幼苗生长的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2015, 20(6): 16–24
- Xie Q, Chen G Y, Tao H B, et al. Effects of drought and irrigation after sowing on maize seedling growth[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(6): 16–24
- [7] 齐健, 宋凤斌, 刘胜群. 苗期玉米根叶对干旱胁迫的生理响应[J]. *生态环境*, 2006, 15(6): 1264–1268
- Qi J, Song F B, Liu S Q. Some physiological response of roots and leaves of *Zea mays* seedling to drought-stress[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(6): 1264–1268
- [8] 张岁岐, 山仑. 磷素营养和水分胁迫对春小麦产量及水分利用效率的影响[J]. *西北农业学报*, 1997, 6(1): 22–25
- Zhang S Q, Shan L. The effects of phosphorus nutrition and water stress on yield and water use efficiency of spring wheat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 1997, 6(1): 22–25
- [9] 梁银丽, 康绍忠, 张成娥. 不同水分条件下小麦生长特性及氮磷营养的调节作用[J]. *干旱地区农业研究*, 1999, 17(4): 58–64
- Liang Y L, Kang S Z, Zhang C E. Growth characteristics of winter wheat and adjustment of nitrogen and phosphorus on it under different water conditions[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1999, 17(4): 58–64
- [10] 张国盛, 张仁陟. 水分胁迫下氮磷营养对小麦根系发育的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2001, 36(2): 163–167
- Zhang G S, Zhang R Z. The influence of nitrogen, phosphorus nutrition on the root characteristics matters of spring wheat under water stress[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2001, 36(2): 163–167
- [11] 李虹, 张锡梅. 不同基因型小麦苗期对低磷和水分胁迫的反应[J]. *干旱地区农业研究*, 2001, 19(1): 72–78
- Li H, Zhang X M. Responses of different genotypic wheat seedlings to phosphorus and water deficiency[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2001, 19(1): 72–78
- [12] 钟鹏, 朱占林, 李志刚, 等. 干旱和低磷胁迫对大豆叶保护酶活性的影响[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(2): 153–154
- Zhong P, Zhu Z L, Li Z G, et al. Effects of low-phosphorus and drought stresses on protective enzyme activities of soybean[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(2): 153–154
- [13] 曲东, 王保莉, 山仑, 等. 水分胁迫下磷对玉米叶片光合色素的影响[J]. *西北农业大学学报*, 1996, 24(4): 94–97
- Qu D, Wang B L, Shan L, et al. Effect of phosphorus on photosynthetic pigment of maize under water stress[J]. *Acta Universitatis Agriculturae Boreali-Occidentalis*, 1996, 24(4): 94–97
- [14] 沈玉芳, 王保莉, 曲东, 等. 水分胁迫下磷营养对玉米苗期根系导水率的影响[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2002, 30(5): 11–15
- Shen Y F, Wang B L, Qu D, et al. Effects of phosphorus on root hydraulic conductance of corn under water stress[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition*, 2002, 30(5): 11–15
- [15] 王同朝, 常思敏, 刘作新, 等. 水磷耦合效应对玉米苗期生长和水分利用效率的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2002, 36(3): 214–217
- Wang T C, Chang S M, Liu Z X, et al. The couple effect of water and phosphorus on maize growth and water use efficiency in the seedling stage[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2002, 36(3): 214–217
- [16] 赵世杰, 刘华山, 董新纯. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1998
- Zhao S J, Liu H S, Dong X C. *Plant Physiology Experiment*[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 1998
- [17] Giannopolitis C N, Ries S K. Superoxide dismutases. Purification and quantitative relationship with water-soluble protein in seedlings[J]. *Plant Physiology*, 1977, 59(2): 315–318
- [18] Omran R G. Peroxide levels and the activities of catalase, peroxidase, and indoleacetic acid oxidase during and after chilling cucumber seedlings[J]. *Plant Physiology*, 1980, 65(2): 407–408
- [19] Chance B, Maehly A C. Assay of catalases and peroxidases: Catalase: $2\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ (1); Catalase and Peroxidase: $\text{ROH} + \text{AH}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{ROH} + \text{A}$ (2)[J]. *Methods in Enzymology*, 1955, 2: 764–775
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010
- Bao S D. *Soil Agro-Chemical Analysis*[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2010
- [21] 潘晓华, 石庆华, 郭进耀, 等. 无机磷对植物叶片光合作用的影响及其机理的研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 1997, 3(3): 201–208
- Pan X H, Shi Q H, Guo J Y, et al. Advance in the study of effects of inorganic phosphate on plant leaf photosynthesis and its mechanism[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1997, 3(3): 201–208
- [22] Kramer P J. *Plant and Water Relationships: A Modern Synthesis*[M]. New York: McGraw-Hill, 1969: 313–314
- [23] 赵长海, 逢焕成, 李玉义. 水磷互作对潮土玉米苗期生长及磷素积累的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(1): 236–240
- Zhao C H, Pang H C, Li Y L. Effect of interaction of water and phosphorus on maize growth and phosphorus accumulation in fluvo-aquic soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(1): 236–240
- [24] 王宝山. 生物自由基与植物膜伤害[J]. *植物生理学通讯*, 1988(2): 12–16
- Wang B S. Biological free radicals and membrane damage of plants[J]. *Plant Physiology Communications*, 1988(2): 12–16

- [25] 曾广伟, 兰进好, 刘义国, 等. 不同土壤水分条件下施磷对小麦光合性能和产量影响比较[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(5): 41–46
Zeng G W, Lan J H, Liu Y G, et al. Comparison of effects of different soil water conditions and phosphorus application on photosynthesis and yield of wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(5): 41–46
- [26] 张富仓. 土壤 - 根系统养分迁移机制及其数值模拟[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2001
Zhang F C. Mechanisms and modeling of nutrient movement at the soil-root system[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2001
- [27] 袁新民, 同延安, 杨学云, 等. 施用磷肥对土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(4): 397–403
Yuan X M, Tong Y A, Yang X Y, et al. Effect of phosphate application on soil nitrate nitrogen accumulation[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(4): 397–403
- [28] 黄莹, 赵牧秋, 王永壮, 等. 长期不同施磷条件下玉米产量、养分吸收及土壤养分平衡状况[J]. 生态学杂志, 2014, 33(3): 694–701
Huang Y, Zhao M Q, Wang Y Z, et al. Corn yield, nutrient uptake and soil nutrient budget under different long-term phosphorus fertilizations[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(3): 694–701
- [29] Singer J W, Logsdon S D, Meek D W. Tillage and compost effects on corn growth, nutrient accumulation, and grain yield[J]. Agronomy Journal, 2007, 99(1): 80–87
- [30] Bélanger G, Ziadi N. Phosphorus and nitrogen relationships during spring growth of an aging timothy sward[J]. Agronomy Journal, 2008, 100(6): 1757–1762